Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 115-128

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۲۸-۱۱۵

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب

جابر سلیمانی[۱]، محمد حسین کیانمهر[۲*]، سید رضا حسن بیگی[۳]، سید مهدی شریعتمداری[۴]، کوروش رضا پور[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۹

چکیده

یکی از منابع زیست‌توده فضولات دامی می‌باشد. فرآوری کود گاوی با استفاده از دستگاه‌های فشرده‌ساز (اکسترودر) به‌دلیل بزرگ بودن اندازه ذرات کود و محتویات آن (کاه و کلش) همواره با مشکلاتی روبه‌رو است. هدف اصلی در این تحقیق طراحی و ساخت دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب می‌باشد. قسمت‌های مختلف دستگاه شامل واحد کوبنده، ضدکوبنده و فنر و پیچ قابل‌تنظیم می‌باشد. در این خردکن از مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم برای تنظیم فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده برای دستیابی به اندازه ذرات نهایی مطلوب استفاده شده است. در هر آزمون مقداری کود گاوی به‌وسیله دستگاه آسیاب شد و قطر میانگین هندسی اندازه ذرات کود گاوی برای سه سطح محتوای رطوبتی شامل ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (بر مبنای تر) و سه سطح سرعت دورانی واحد کوبنده شامل ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه تعیین شد. به این منظور از یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار استفاده شد. توزیع اندازه ذرات کود گاوی درتمام سطوح محتوای رطوبتی و سرعت دورانی واحد کوبنده، به‌صورت نرمال بود. گسترده‌ترین توزیع در محتواهای رطوبتی ۳۵ و ۴۰ درصد (بر مبنای تر) در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و در محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه مشاهده شد. خرد شدن کود گاوی توسط دستگاه خردکن در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر)، دارای کمترین قطر میانگین هندسی اندازه ذرات و برابر با ۱/۰۲ میلی‌متر بود. افزون براین نتایج، بیشترین انرژی مصرفی ویژه دستگاه خردکن کود گاوی در محتوای رطوبتی ۴۵٪ و سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه برابر با ۶۴/۲ کیلوژول بر کیلوگرم بود. همچنین استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب سبب کاهش انرژی مصرفی ویژه خرد کردن کود گاوی به میزان ۹۲٪ نسبت به روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) در خط تولید پلت شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب، قطر میانگین هندسی ذرات، کود گاوی مرطوب

مقدمه

منابع زیست‌توده کشور را می‌توان به پنج منبع تقسیم‌بندی کرد، یکی از این منابع فضولات دامی بوده که در سال، حدود شش میلیون تن کود گاوی در کشور تولید می‌شود. کود گاوی از فضولات مایع، جامد و کاه و کلش مورد استفاده برای تهیه بستر گاوداری تشکیل شده است (Rezaeifar *et al.*, 2008; Suna, 2012). استفاده از فضولات دامی به‌صورت فرآوری نشده با مشکلاتی همراه است. جرم حجمی این کودها کم بوده و با توجه به حجم زیاد مورد استفاده در واحد سطح، حمل و نقل و انبارداری این کودها هزینه بسیاری دربردارد. یکی از راه‌حل‌های مرتفع کردن این مشکلات، فشرده‌سازی و متراکم‌سازی کود است که این کار توسط روش‌های مختلفی از جمله پلت‌سازی توسط دستگاه اکسترودر قابل انجام است. پلت کردن مواد سبب کاهش هزینه‌های جابه‌جایی، ذخیره‌سازی و حمل و نقل و هم‌چنین بهبود کیفیت و دوام مواد می‌شود. مراحل تولید پلت کود با استفاده از دستگاه اکسترودر شامل: ۱- دریافت کود گاوی از دامداری (رطوبت کود گاوی زیاد است و در مواردی به ۸۰٪ می‌رسد)، ۲- خشک کردن، ۳- کاهش اندازه‌ی ذرات مواد کود گاوی، ۳- تولید پلت کود توسط دستگاه اکسترودر (رطوبت کود در هنگام تولید پلت توسط اکسترودور در محدوده ۳۵ الی ۴۵ درصد می‌باشد)، ۴-خشک کردن و ۵- بسته‌بندی می‌باشد (Padilla-Rivera *et al.*, 2017). پلت کود گاوی می‌تواند به‌عنوان کود در زمین‌های زراعی و باغات استفاده شود. هم‌چنین می‌تواند به‌منظور تولید بیوگاز با بقایای کلزا و گندم ترکیب شود (Safari and Abdi, 2015).

از آسیاب‌ها جهت کاهش اندازه ذرات مواد استفاده می‌شود. کاهش اندازه ذرات، مجموع مساحت قابل دستیابی، اندازه منافذ مواد و تعداد نقاط تماس برای اتصال بین ذرات در فرآیند تراکم را افزایش می‌دهد (Drzymała, 1993). هم‌چنین یکی از عوامل موثر در کیفیت پلت تولیدی، اندازه‌ی ابعاد ذرات می‌باشد (Payne, 1978). انواع مختلفی از آسیاب‌ها شامل: آسیاب‌های توپی، ارتعاشی، چکشی،

۱- پژوهشگر مرکز تحقیقات و نوآوری سازمان اتکا، تهران و دانشجوی کارشناسی ارشد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۲- استاد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۳- استاد بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۴- مربی بخش فنی کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران
۵- معاونت تولید شرکت هلدینگ مزارع نوین ایرانیان
(*- نویسنده مسئول: Email: kianmehr@ut.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v10i2.74480

چاقویی، غلتکی، کلوئیدی[1] و فرسایشی برای خرد کردن مواد زیست‌توده لیگنوسلولوزی استفاده می‌شود. انتخاب دستگاه آسیاب مناسب به‌طور ویژه به مقدار رطوبت موجود در مواد زیست‌توده بستگی دارد (Taherzadeh and Karimi, 2008). بر این اساس آسیاب‌ها را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی نمود: ۱-دستگاه‌هایی که در محدوده‌ی رطوبتی ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) کاربرد دارند و ۲-دستگاه‌هایی که در محتوای رطوبتی بیشتر از ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kratky and Jirout, 2011). بررسی‌ها نشان داده که آسیاب‌های کلوئیدی برای خرد کردن مواد مرطوب با رطوبت بیش از ۱۵ تا ۲۰ درصد (بر مبنای تر) مناسب بوده، در حالی‌که آسیاب‌های غلتکی، سایشی، چکشی یا چاقویی مناسب برای خرد کردن مواد زیست‌توده با رطوبت ۱۵-۱۰ درصد (بر مبنای تر) مناسب هستند (Taherzadeh and Karimi, 2008). هم‌چنین آسیاب‌های دیسکی مرطوب و رتینگ میل[2]، توانایی خرد کردن مواد در محتوای رطوبتی بالای ۲۰٪ را دارا هستند. آسیاب‌های توپی به‌دلیل عمکرد آن‌ها در محتوای رطوبتی کمتر از ۲۰٪ و بیشتر از ۲۰٪ در هر دو گروه از این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند (Kratky and Jirout, 2011). در صورت استفاده از آسیاب‌هایی مانند آسیاب‌های چکشی جهت کاهش اندازه کود گاوی لازم است محتوای رطوبتی به حدود ۱۵ درصد (بر مبنای تر) کاهش یابد. با توجه به این‌که پلت کردن کود گاوی با استفاده از دستگاه اکسترودر در محدوده‌ی محتوای رطوبتی ۴۵-۳۵ درصد (بر مبنای تر) انجام می‌پذیرد، خرد کردن کود گاوی در محدوده‌ی رطوبتی اشاره شده، با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب می‌تواند با حذف مرحله‌ی خشک کردن مواد قبل از کاهش اندازه‌ی آن‌ها، سبب تسریع در فرآیند تولید پلت، ذخیره‌سازی انرژی و مقرون به‌صرفه از نظر اقتصادی خواهد بود.

بررسی منابع نشان می‌دهند که جهت کارکرد مناسب واحد کوبنده عوامل متعددی نظیر: قطر کوبنده، سرعت کوبنده، فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده، نرخ تغذیه مواد، محتوای رطوبتی تاثیر می‌گذارند (Klenin *et al.*, 1985). زانکر در سال ۱۹۸۰ جهت تعیین قطر کوبنده از نوموگراف استفاده کرد (Zanker, 1980). در این روش با استفاده از اندازه‌های اولیه و ثانویه مواد و ضریب اصکاک داخلی مواد، قطر واحد کوبنده به‌دست می‌آید.

انرژی مصرفی ویژه مواد آسیاب شده به میزان رطوبت، حجم و تراکم ذرات، میزان تغذیه مواد، توزیع اندازه ذرات (اندازه ذرات اولیه / نهایی) و متغیرهای ماشین بستگی دارد (Lopo, 2002). تحقیقاتی در رابطه با انرژی مصرفی ویژه جهت خرد کردن مواد زیست با استفاده از آسیاب‌هایی که قادرند مواد را در محدوده‌ی رطوبتی ۲۰٪-۱۵ (بر مبنای تر) خرد کنند، صورت پذیرفته است. تحقیقات مانی و همکاران در مورد کاهش اندازه ذرات ساقه‌های گندم و جو، علوفه ذرت و سورگوم نشان داد که با افزایش محتوای رطوبتی انرژی مصرفی ویژه افزایش می‌یابد؛ این محققان میزان انرژی مصرفی ویژه آسیاب چکشی برای خرد کردن ساقه‌ی ذرت در محتوای رطوبتی ۸ و ۱۲٪ با اندازه‌ی ذرات مواد اولیه و نهایی به‌ترتیب ۷/۱۶ و ۱/۶میلی‌متر را به‌ترتیب ۱۴/۷۶ و $kWht^{-1}$ ۱۹/۸۴ گزارش کردند (Mani *et al.*, 2004). رضوانی و همکاران با استفاده از آسیاب چکشی، ساقه‌های برنج را در محتوای رطوبتی ۱۲٪، اندازه‌ی غربال آسیاب ۲ میلی‌متر، آسیاب کرده و بیشترین انرژی مصرفی ویژه را $kWht^{-1}$ ۳۲/۴۶ گزارش دادند (Rezvani *et al.*, 2013). هیدنو و همکارن با استفاده از آسیاب سایشی، برای خرد کردن چوب سخت در محدوده‌ی رطوبتی ۶ درصد با اندازه ذرات اولیه و نهایی به‌ترتیب ۱۹/۰۵ و ۱/۶ میلی‌متر انرژی مصرفی ویژه دستگاه را $kwht^{-1}$ ۴۰۰-۲۰۰ گزارش دادند (Hideno *et al.*, 2009). کبایاشی و همکاران با استفاده از آسیاب ارتعاشی جهت خرد کردن چوب سخت در محدوده‌ی رطوبتی ۱۱٪، اندازه ذرات اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۲ و ۰/۱۵ میلی‌متر، انرژی مصرفی ویژه آسیاب ارتعاشی $kWht^{-1}$ ۸۰۰ گزارش دادند (Kobayashi *et al.*, 2008). ماندلز و همکاران با استفاده از آسیاب‌های توپی و کلوئیدی، جهت خرد کردن ساقه‌ی برنج در محتوای رطوبتی ۶-۴٪، اندازه ذرات نهایی کم‌تر از ۲ میلی‌متر، انرژی مصرفی ویژه آسیاب توپی $kWht^{-1}$ ۳۰۰۰۰ و انرژی مصرفی ویژه آسیاب کلوئیدی$kWht^{-1}$ ۱۵۰۰ گزارش دادند (به اندازه اولیه ذرات اشاره نشده است) (Mandels *et al.*, 1974). شل و هاردوود انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب‌های چکشی، چاقویی و آسیاب دیسکی جهت خرد کردن خرده‌های چوب، ساقه گندم و علوفه ذرت با محتوای رطوبتی ۷-۴٪ (بر مبنای تر) با اندازه نهایی ذرات ۲-۱ میلی‌متر، گزارش کردند (به اندازه‌ی اولیه ذرات اشاره‌ای نشده است). آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب دیسکی، $kwht^{-1}$ ۴۰۰-۲۰۰ بود. بدین ترتیب برای آسیاب چکشی، $kwht^{-1}$ ۱۳۰-۹۰ و در نهایت آسیاب چاقویی که انرژی مصرفی ویژه مورد نیازش $kwht^{-1}$ ۱۲۰-۸۰ بود (Schell and Harwood, 1994).

نیری و همکاران انرژی حرارتی مورد نیاز برای تبخیر ۳۰۶ و ۳۰۹ گرم آب از کود گاوی مرطوب، با استفاده از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی با سرعت هلیس ۲ و ۳ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر با ۶۹۱/۴۲ و ۶۹۹/۰۸ کیلوژول گزارش دادند (Nayyeri *et al.*, 2008).

از میان انواع آسیاب‌ها، آسیاب‌های کلوئیدی به‌طور گسترده برای خرد کردن مواد زیست‌توده با رطوبت بیشتر از ۲۰-۱۵٪ استفاده شده‌اند. از معایب اساسی آن‌ها می‌توان به انرژی مصرفی ویژه زیاد و

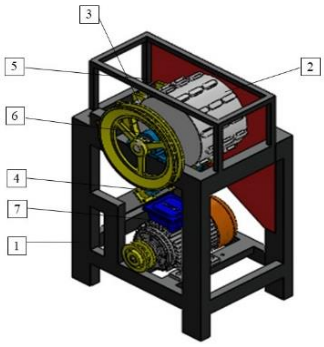
1- Colloid mills
2- Retting mill

خرد کردن مواد به‌صورت آسیاب مدار بسته اشاره کرد. کراتکی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از دستگاه رتینگ میل، انرژی مصرفی ویژه خرد کردن ساقه‌های گندم را در محتوای رطوبتی ۴۰٪، با اندازه‌های اولیه و نهایی مواد به‌ترتیب ۲۰۰ میلی‌متر و کمتر از ۱۰میلی‌متر برابر با ۳۰ $kWht^{-1}$ گزارش داد (Kratky and Jirout, 2015). بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقی در مورد طراحی و ساخت دستگاه خرد کردن کود گاوی با محتوای رطوبتی ۴۵٪–۳۵ انجام نشده است. در تحقیق حاضر با هدف تسریع در فرآیند تولید پلت از کود گاو و کاهش مصرف انرژی یک دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب ساخته شد و عملکرد آن از نظر انرژی مصرفی ویژه با روش مرسوم خرد کردن (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب

شکل ۱ طرحواره و نمونه ساخته شده دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب را نشان می‌دهد. این دستگاه دارای سه بخش اساسی کوبنده، ضد کوبنده، فنر و پیچ قابل‌تنظیم است. برای ساخت دستگاه ابتدا نقشه‌های آن با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks نسخه ۲۰۱۸ رسم و سپس دستگاه براساس نقشه‌ها ساخته شد. آزمایش‌های اولیه روی دستگاه انجام و عیوب احتمالی آن برطرف شد.



شکل ۱- طرحواره‌ی دستگاه خردکن کود دامی مرطوب (۱- شاسی، ۲- واحد کوبنده، ۳- ضد کوبنده، ۴- فنر و پیچ قابل‌تنظیم، ۵- واحد تغذیه، ۶- یاتاقان، ۷- موتور الکتریکی)

Fig.1. Schematic and prototype of wet cattle manure size reduction machine (1- Frame, 2- Thresher unit, 3- Anti-thresher, 4- Spring and adjustment screw, 5- Chamber, 6- Bearing, 7. Electric motor)

ساخت کوبنده و ضد کوبنده

عوامل متعددی در کارکرد مناسب کوبنده تأثیر می‌گذارند که می‌توان به قطر کوبنده و فاصله‌ی بین کوبنده و ضدکوبنده اشاره کرد (Klenin *et al.*, 1985). برای طراحی قسمت کوبنده و ضدکوبنده دستگاه یافتن رابطه‌ای بین قطر کوبنده، فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده با توجه به قطر ذره‌ی تغذیه شده ضروری است. رابطه‌ای بین قطر غلتک و اندازه‌ی ذرات نهایی را که می‌توان از آسیاب انتظار داشت توسط رابطه (۱) بیان می‌شود (Ortega-Rivas *et al.*, 2006).

$$\cos\alpha = \frac{R+d}{R+r} \qquad (۱)$$

که در این رابطه: d، نصف فاصله‌ی بین غلتک کوبنده و ضد کوبنده (mm)، r، شعاع ذره (mm)، R، شعاع غلتک (mm) و α، زاویه تماس[1] (زاویه‌ای که از طرف مماس‌های صفحه‌ی غلتک‌ها در نقطه تماس بین یک ذره و غلتک‌ها تشکیل می‌شود) می‌باشد. بنابراین 2R برابر با قطر غلتک، 2r برابر با قطر ذرات اولیه، 2d همان قطر ذرات نهایی می‌باشد.

بعد از محاسبات لازم برای به‌دست آوردن قطر کوبنده و ضد کوبنده، ابتدا واحد کوبنده ماشین ساخته شد. محور واحد کوبنده درون دو عدد یاتاقان خود تنظیم با کد UCP 206 بر روی شاسی قرار گرفت (شماره ۶ در شکل ۱). جهت ساخت واحد کوبنده (شماره ۲ در شکل ۱)، یک لوله فولادی به قطر ۳۱۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. لبه‌ها (لقمه‌های روی کوبنده) به شکل چهار پهلو از جنس فولاد با سطح مقطع ۱۰×۲۰ میلی‌متر مربع و به ضخامت ده میلی‌متر انتخاب شد. لبه‌ها در راستای محور کوبنده شامل ۱۲ ردیف و سه عدد لقمه در هر ردیف با فاصله‌ی ۶۰ میلی‌متر (مرکز تا مرکز) از یکدیگر، بر روی محیط استوانه کوبنده جوش داده شدند. جهت جلوگیری از در رفتگی مواد و بیشترین برخورد لبه‌ها با مواد، چیدمان ردیف‌های لبه به گونه‌ای است که ردیف اول به فاصله‌ی۲۰ میلی‌متر از سمت راست استوانه کوبنده و ردیف بعدی به فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر از طرف چپ استوانه کوبنده قرار گرفته است (حالت زیگزاگ) و بدین ترتیب تا ردیف دوازدهم ادامه می‌یابد (شکل ۲).

1- Angle of nip



شکل ۲- طرحواره‌ای از کوبنده و نمونه‌ی ساخته شده

Fig.2. Schematic and prototype of drum

برای ساخت ضد کوبنده یک ورق فولادی از جنس St_37 به ابعاد ۲۱ × ۱۰۶ سانتی‌متر مربع، به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه نورد به‌صورت دایره‌ای به قطر بیرونی ۳۴۰ میلی‌متر شکل داده شد. ضد کوبنده به‌صورت ربع دایره که شش ردیف از لبه‌هایی به شکل چهار پهلو در محیط داخلی آن جانمایی شده، ساخته شد. لبه‌های ضد کوبنده همانند لبه‌های کوبنده از جهت اندازه، ارتفاع، فاصله‌ی مرکز تا مرکز، چیدمان و فاصله‌ی ردیف‌ها از یکدیگر ساخته شد. در محیط بیرونی ضد کوبنده از تسمه‌هایی برای تقویت ضد کوبنده در برابر نیروهای اعمالی بر آن و اتصال به بدنه‌ی دستگاه و پیچ و فنر استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳- طرحواره ای از ضد کوبنده و نمونه‌ی ساخته شده

Fig.3. Schematic and prototype of anti-thresher

مکانیزم خردکردن این دستگاه ترکیبی از سایش و برش است که نیروها به‌صورت فشاری و برشی به ذرات کود گاوی اعمال می‌شود. از نظر طراحی، دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب به‌صورت صفحه-غلتک (کوبنده و ضد کوبنده) می‌باشد، نیروهای برشی و نیروهای فشاری وارد بر ذرات می‌توانند به‌راحتی از طریق لبه‌های دستگاه خردکن ایجاد شوند. لبه‌های تیز دستگاه خردکن در ردیف‌هایی حول سطح بیرونی کوبنده دستگاه نصب شده‌اند. علاوه بر این، در این نوع خردکن، صفحه (ضد کوبنده) انحنای مناسب دارد، که این حالت هندسی، فضای کافی برای نصب ردیف‌های متفاوت لبه‌های دستگاه خردکن را فراهم می‌آورد و درنتیجه آن نیروهای برشی به کود گاوی اعمال می‌شود.

ساخت فنر مارپیچی فشاری

با توجه به محدودیت فضا برای نصب مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم فنرهایی جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. جدول ۱ مشخصات فنر انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فنر انتخاب شده

Table 1- Characteristics of selected spring

مشخصات فنر **Characteristics of spring**	یکای اندازه‌گیری **Dimension**
تعداد حلقه‌های فعال (دو سر سنگ زده) Number of Active Coils (Squared and Ground)	5
طول آزاد Free length	10.2 mm
طول بسته Solid length	80 mm
قطر میانگین فنر Mean coil diameter	45 mm
مدول برشی Shear modulus	70×10^9 Pa
قطر مفتول Wire diameter	6 mm

برای تعیین ثابت فنر از دستگاه آزمایش کشش و فشار ساخته شده در پردیس ابوریحان استفاده شد. دستگاه مذکور منحنی نیرو- جابه‌جایی فنر را تحت بارگذاری شبه‌استاتیک مشخص می‌کند که با استفاده از آن می‌توان ثابت فنر را تعیین کرد. هم‌چنین داده‌های اندازه‌گیری توسط واحد داده خوان مدل CAMOS ثبت گردید. سرعت بارگذاری ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه بود. بدین منظور از نیروسنج ۲۰۰۰ نیوتنی با دقت ۰/۵ نیوتن استفاده شد.

برای اطمینان از مقدار ثابت فنر به‌دست آمده از منحنی دستگاه آزمایش کشش و فشار (شکل ۵) از رابطه‌ی (۲) استفاده شد .

$$K = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \qquad (۲)$$

که در این رابطه: d، قطر سیم فنر (mm)، k، ثابت فنر ($N\ mm^{-1}$)، D، قطر میانگین فنر (mm)، G، مدول برشی (MPa)، N، تعداد حلقه‌های فعال می‌باشد.

دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب دارای دو حرکت دورانی و خطی می‌باشد (شکل ۴). حرکت خطی ضد کوبنده توسط مکانیزم پیچ قابل‌تنظیم و فنر که در قسمت زیرین ضد کوبنده نصب شده است صورت می‌پذیرد. توسط این مکانیزم فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده تنظیم می‌شود. هم‌چنین این حرکت عکس‌العملی است که ضد کوبنده در هنگام بیش باری خواهد داشت. شکل ۶ قطعات مکانیزم فنر و پیچ قابل‌تنظیم را نشان می‌دهد. برای تنظیم فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده از مهره (به‌طوری‌که بستن مهره‌ها سبب نزدیک شدن ضدکوبنده به کوبنده می‌شود) استفاده شد. به‌منظور باز و بسته شدن مهره، طول ۳۰ میلی‌متر از پیستون (شماره ۳ در شکل ۶) و سیلندر (شماره ۲ در شکل ۶) به قطر ۳۵ میلی‌متر توسط دستگاه تراش با گام کوتاه متریک ۱/۵ رزوه شد.

تعیین سرعت دورانی کوبنده

سرعت دورانی کوبنده تحت تاثیر عواملی نظیر: نوع و محتوای رطوبت کود گاوی، فاصله بین کوبنده و ضدکوبنده، نرخ تغذیه و هم‌چنین میزان خردشدگی (اندازه ذرات) انتخاب می‌گردد در این تحقیق محدوده سرعت دورانی مطلوب برای کوبنده از طریق آزمایش در محدوده‌ی سرعت دورانی ۱۰۰ تا ۷۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که برای سرعت چرخشی بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه، کاه غلات موجود در کود گاوی خرد نشده و بدون اثرپذیری از کوبنده و ضد کوبنده، تنها با غلتک کوبنده می‌چرخد و در نهایت در محفظه آسیاب تجمع می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز واحد کوبنده دستگاه خردکن باشد (اولین محدودیت). همچنین در سرعت‌های بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه واحد کوبنده لرزش دستگاه مشاهده شد که این امر هم می‌تواند سبب تلفات در آسیاب‌های سایشی شود (Klenin *et al.*, 1985). مسدود شدن محفظه آسیاب با کاه موجود در کود گاوی برای سرعت دورانی کمتر از ۱۵۰ دور بر دقیقه مشاهده شد (دومین محدودیت). همچنین به دلیل کم بودن سرعت دورانی و نیروی گریز از مرکز کوبنده توان لازم برای هدایت مواد به سمت فاصله‌ی بین کوبنده و ضد کوبنده وجود نداشت.

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به اثر سرعت دورانی کوبنده بر روی میزان خردشدگی کود گاوی مرطوب و انرژی مصرفی از یک موتور الکتریکی AC، سه فاز، 380 V، 3kW، (MOTOGEN، IRAN، 100L4B) با سرعت دوانی ۱۴۴۰ دور بر دقیقه، استفاده شد.

هم‌چنین برای تغییر سرعت دورانی موتور الکتریکی، از یک اینورتر سه فاز به سه فاز LS مدل SV_40iG5A4 استفاده شد.

تعیین رطوبت و انرژی حرارتی مورد نیاز جهت خشک کردن

دستگاه اکسترودر قادر است کود گاوی با محتوای رطوبتی ۴۵-۳۵ درصد (بر مبنای‌تر) را پلت کند؛ بنابراین سه سطح محتوای رطوبتی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (بر مبنای‌تر) برای انجام آزمایش‌ها تهیه شد. برای تعیین محتوای رطوبت اولیه کود سه نمونه ۱۰۰ گرمی از کود طبق استاندارد ASAE S358.3 در داخل آون با دمای ۱۰۳±۳°C به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبتی طبق رابطه‌ی (۳) بر مبنای تر سنجیده شد.

$$M_{W.b}\% = \frac{W_w}{W_w + W_d} \times 100\% \qquad (۳)$$

که در این رابطه: $M_{w.b}$، رطوبت کود دامی بر مبنای تر (٪)، w_w، جرم آب موجود در کود (g) و w_d، جرم ماده خشک موجود در کود (g) می‌باشد. برای تهیه نمونه‌هایی با سطوح رطوبتی مورد نظر برای هر آزمایش، طبق رابطه (۴) با آب‌پاش به کود آب مقطر اضافه گردید.

$$m_w = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{(1 - M_{wf})} \qquad (۴)$$

که در این رابطه: M_{wi}، رطوبت اولیه کود بر مبنای خشک، M_{wf}، رطوبت نهایی بر مبنای خشک، m_i، جرم اولیه کود بر مبنای خشک (g)، و m_w، جرم آب اضافه شده (g) می‌باشد. پس از اضافه نمودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی دربسته در یخچال با دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا رطوبت به‌طور یکنواخت در نمونه‌ها توزیع شود. برای تعیین مقدار واقعی رطوبت نمونه‌ها، سه نمونه ۱۰ گرمی از هر سطح رطوبتی در آون قرار داده شد (ASAE S358.3, 2012).

جهت مقایسه انرژی مصرفی ویژه آسیاب کود گاوی در حالت مرطوب (استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب) و در روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) در خط تولید پلت، محاسبات لازم جهت خشک کردن یک کیلوگرم کود گاوی از رطوبت اولیه ۴۵ درصد (بر مبنای تر) تا رطوبت ثانویه ۱۰ درصد (برمبنای تر) انجام گرفت. این کاهش رطوبت مواد در خط تولید پلت (در حالت آسیاب مواد به‌صورت خشک)، توسط خشک‌کن‌ها

انجام می‌پذیرد. برای به‌دست آوردن انرژی حرارتی لازم جهت تبخیر آب محصول، از رابطه‌ی (۵) استفاده می‌شود.

$$Q = w_w \lambda \quad (5)$$

که در این رابطه:

Q، انرژی حرارتی (J)

W_w، جرم آب موجود در کود (g)

λ ، گرمای نهان تبخیر ($kJ\ kg^{-1}$)

توزیع اندازه ذرات

نمونه‌های ۱۰۰ گرمی از مواد آسیاب شده در حالات مختلف بر روی یک دسته الک که به‌ترتیب از بالا به پایین دارای روزنه‌های ریزتری بودند قرار داده شد. الک‌ها با توجه به اندازه مواد خرد شده انتخاب شد. برای مواد آسیاب شده از الک‌هایی با اندازه استاندارد آمریکایی ۱۰، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ انتخاب شد. اندازه روزنه الک‌ها به‌ترتیب ۴/۷۵، ۲، ۱/۱۹، ۰/۸۴۱، ۰/۵۹۵، ۰/۴۲، ۰/۲۹۷، ۰/۲۱ و ۰/۱۴۹ میلی‌متر بود. دسته الک‌ها بر روی شیکر (فن آزما گستر، مدل SM 12) قرار گرفت. مدت زمان الک نمونه‌ها بر اساس استاندارد ۱۰ دقیقه بود. بعد از الک نمونه‌ها، جرم باقی‌مانده بر روی هر الک اندازه گرفته شد. الک‌کردن نمونه‌ها ۳ بار تکرار شد. میانگین هندسی اندازه ذرات (d_{gw}) و انحراف معیار (S_{gw}) برای نمونه‌ها براساس استاندارد و روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه شد (ASAE S319.3, 2000). از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ برای توزیع اندازه ذرات و نرمال بودن توزیع اندازه ذرات استفاده شد.

$$d_{gw} = \log^{-1}\left[\frac{\sum(W_i d_i^-)}{\sum W_i}\right] \quad (6)$$

$$S_{gw} = log\left[\frac{\sum W_i\left(log d_i^- - log\, d_{gw}\right)}{\sum W_i}\right]^{0.5} \quad (7)$$

$$d_i^- = (d_i \times d_{i+1})^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

d_{gw}، میانگین هندسی اندازه ذرات (mm)

S_{gw}، انحراف معیار هندسی ذرات (mm)

W_i، ذرات باقی‌مانده در الک i

d_i، اندازه اسمی الک i (mm)

d_{i+1}، اندازه اسمی الک i+1 (mm)

d_i^-، میانگین هندسی اندازه ذرات الک i ام

محاسبه‌ی انرژی مصرفی ویژه

به‌منظور اندازه‌گیری توان مصرفی خرد کردن کود گاوی از دستگاه Power Analyzer (مدل DW-6090A تک‌فاز ساخت کشور تایوان) که توانایی اتصال به رایانه و ذخیره داده‌ها را داشت، استفاده شد. برای نمایش داده‌های اندازه‌گیری شده، خروجی قسمت RS-232 دستگاه پاور آنالیزر به رایانه وصل و داده‌هابا استفاده از نرم‌افزار Lutron-8 ذخیره شد. داده‌های ذخیره شده در رایانه شامل ولتاژ (V)، آمپر (A)، توان الکتریکی (P)، فرکانس (Hz)، cos φ و زمان (S) در هر یک ثانیه بودند. توان لازم برای راه‌اندازی آسیاب قبل از ورود مواد (بدون بار) اندازه‌گیری شد. با توجه به مقدار توان مصرفی آسیاب در حالت بدون بار، توان مصرفی ویژه مورد نیاز برای آسیاب مواد تعیین شد. انرژی مصرفی ویژه برای آسیاب کود گاوی با استفاده از رابطه‌ی (۹) محاسبه گردید (Balk, 1964).

$$E = \frac{\int_0^T (P_t - P_0)\, dt}{m} = \frac{\int_0^T \Delta P_t\ dt}{m} \quad (9)$$

که در این رابطه:

E، انرژی مصرفی ویژه برای آسیاب ($kJ\ kg^{-1}$)

P_t، توان مصرفی در لحظه t (kW)

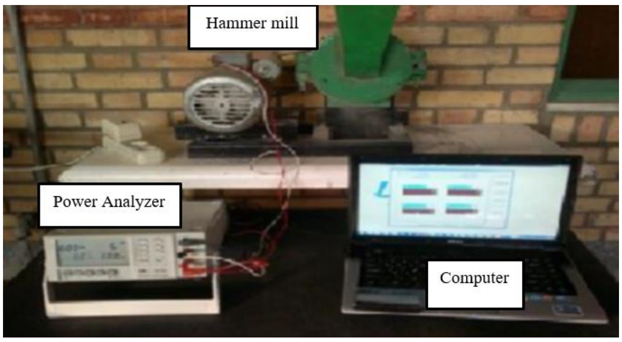
P_0، توان مصرفی در حالت بی‌بار (kW)

ΔPt، توان مصرفی ویژه در زمان t (kW)

m، جرم مواد آسیاب شده (kg)

T= زمان پایان خرد کردن کود

شکل ۴ نحوه‌ی انجام آزمایش و تعیین انرژی مصرفی ویژه برای خرد کردن کود گاوی را نشان می‌دهد. نرخ تغذیه مواد به دستگاه خردکن برای همه‌ی نمونه‌ها مقداری ثابت و برابر با ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه بود.



شکل ٤- آسیاب چکشی به همراه دستگاه پاور آنالایزر و اندازه‌گیری انرژی مصرفی ویژه

Fig.4. Hammer mill with power analyzer and special energy consumption measure

نتایج و بحث

شکل ۵ دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد. شاسی دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب داری ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر، طول ۵۶۰ میلی‌متر و عرض ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد و شاسی مربوط به واحد تغذیه دستگاه داری ارتفاع ۲۱۰ میلی‌متر، طول ۵۶۰ میلی‌متر و عرض ۲۱۰ میلی‌متر و وزن دستگاه ۹۳/۶۲ کیلوگرم می‌باشد. انتقال توان از موتور به محور کوبنده از طریق تسمه و پولی با نسبت ۱:۳ صورت پذیرفت. جزییات بخش‌های دیگر دستگاه در ذیل بیان شده است.

قطر کوبنده

با توجه به اندازه‌ی اولیه و نهایی مواد به‌ترتیب برابر با ۲۰ میلی‌متر و کمتر از ۵ میلی‌متر و مقدار زاویه تماس ۱۸درجه (با توجه به محدودیت فضای نصب)، از یک لوله‌ی استاندارد با قطر بیرونی ۳۱۰ میلی‌متر برای ساخت واحد کوبنده استفاده شد. با استفاده از نوموگراف زانکر قطر کوبنده برای خرد کردن کاه غلات (کاه جو) با اندازه قطر میانگین مواد اولیه زیر ۵ میلی‌متر و ضریب اصطکاک ۰/۲۷ (در محتوای رطوبتی ۴۵/۷ درصد (برمبنای تر))، زیر ۴۰۰ میلی‌متر به‌دست می‌آید (Afzalinia and Roberge, 2007; Zanker, 1980). هم‌چنین برای خرد کردن کود الاغ با اندازه قطر میانگین ۲۰ میلی‌متر با ضریب اصطکاک داخلی ۰/۶، قطر واحد کوبنده زیر ۳۵۰ میلی‌متر به‌دست آمد (Reddy, 2014; Zanker, 1980).

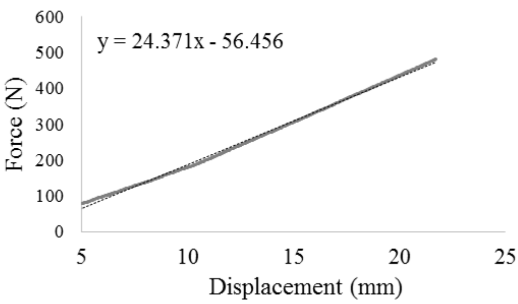
ثابت فنر مارپیچ فشاری

فنر مورد استفاده در مکانیزم دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب از نوع فشاری با مشخصات طول آزاد ۱۰/۲ سانتی‌متر، قطر سیم شش میلی‌متر، قطر میانگین حلقه‌ی ۴۴ میلی‌متر، تعداد کل حلقه‌ها برابر با هفت و به‌صورت دو سر تخت و سنگ‌زده طراحی و ساخته شد. مقدار ثابت فنر با استفاده از رابطه‌ی (۲) برابر با ۲۴/۸۸۸ نیوتن بر میلی‌متر به‌دست آمد. شکل ۶ منحنی نیرو-جابه‌جایی فنر را تحت بارگذاری به‌وسیله‌ی نیروسنج ۲۰۰۰ نیوتنی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مقدار ثابت فنر برابر با ۲۴/۴ نیوتن بر میلی‌متر می‌باشد که با نتایج محاسبه شده تطابق دارد.



شکل ۵– نمونه‌ی ساخته شده دستگاه خردکن کود دامی مرطوب

Fig.5. Prototype of wet cattle manure size reduction machine



شکل ٦– نمودار نیرو–جابه‌جایی برای تعیین ثابت فنر

Fig.6. The Force-displacement diagram for determining the spring constant

محدوده‌ی سرعت دورانی کوبنده

بر مبنای آزمایش‌های اولیه، محدوده‌ی سرعت دورانی ۱۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. کرتکی و جیروت در سال ۲۰۱۴ محدوده‌ی سرعت دورانی کوبنده را جهت خرد کردن کاه گندم با محتوای رطوبتی ۴۰ درصد، ۱۵۰ تا ۱۷۰ دور بر دقیقه گزارش دادند (Kratky and Jirout, 2014).

مقایسه انرژی مصرفی ویژه با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب و روش مرسوم

با محاسبات انجام شده انرژی حرارتی لازم برای تبخیر ۳۵۰ گرم آب موجود در یک کیلوگرم کود گاوی مرطوب برابر با ۷۹۰ کیلوژول می‌باشد. نیری و همکاران انرژی حرارتی مورد نیاز برای تبخیر ۳۳۸ گرم آب از کود گاوی مرطوب، با استفاده از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی با سرعت هلیس ۲/۵ دور بر دقیقه را برابر ۷۶۴/۱۲ کیلوژول گزارش دادند (Nayyeri *et al.*, 2008). بیشترین انرژی مصرفی ویژه خرد کردن با استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۶۴/۲ کیلوژول بر کیلوگرم مشاهده شد. همچنین انرژی مصرفی ویژه برای خرد کردن کود گاوی با محتوای رطوبتی ۱۰٪ (بر مبنای تر) بربر با ۳۵/۳۱ کیلوژول بر کیلوگرم به‌دست آمد. بنابراین خرد کردن کود گاوی با استفاده ازدستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در مقایسه با روش مرسوم (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) سبب ذخیره‌ی ۹۲٪ انرژی مصرفی مورد نیاز در خط تولید پلت شد. استفاده از خشک‌کن‌ها در خط تولید پلت عامل اصلی افزایش مصرف انرژی می‌باشد.

کادوحه و لوپز (۱۹۸۹) با استفاده از آسیاب چکشی ساقه‌های گندم را در محتوای رطوبتی ۷٪ و با اندازه‌های اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۲/۴۰ و ۱/۶ میلی‌متر آسیاب کرده و بیشترین انرژی مصرفی ویژه را ۴۲ $kWht^{-1}$ گزارش دادند (Cadoche and López, 1989). کرتکی و جیروت، با استفاده از دستگاه رتینگ میل ساقه‌های گندم را با محتوای رطوبتی ۴۰ درصد (بر مبنای تر) و اندازه‌های اولیه و نهایی به‌ترتیب ۲۰۰ و زیر ۱۰ میلی‌متر، بیشترین انرژی مصرفی ویژه را ۳۰ $kWht^{-1}$ گزارش دادند (Kratky and Jirout, 2014). نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد خرد کردن کاه گندم به‌صورت مستقیم و در حالت مرطوب (استفاده از دستگاه رتینگ میل) نسبت به حالت خشک (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی)، سبب ذخیره‌ی ۹۰٪ انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز خرد کردن کاه گندم می‌شود.

میانگین هندسی اندازه ذرات

میانگین هندسی اندازه ذرات و انحراف معیار برای هر نمونه آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که کمترین میانگین هندسی اندازه ذرات مربوط به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) و بیشترین آن در سرعت دورانی۲۵۰ دور بر دقیقه و محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) اتفاق افتاد. این امر می‌تواند از طرفی به سبب زمان ماندگاری مناسب مواد در محفظه‌ی آسیاب بوده باشد؛ چرا که ذرات در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه، به علت نیروی گریز از مرکز بالا، زمان بسیار کمی را برای آسیاب شدن در محفظه‌ی آسیاب داشته؛ بنابراین میانگین هندسی ذرات در این حالت نسبت به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه با نیروی گریز از مرکز بیشتر بود. هم‌چنین در سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه به دلیل نیروی برشی کم توسط واحد کوبنده، میانگین هندسی ذرات آن نسبت به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه بیشتر بود. در زمان فشرده‌سازی، ذرات کوچک‌تر با جابه‌جایی و پرکردن فضاهای خالی، یک ماده فشرده‌شده چگال‌تر و مقاوم‌تر تولید می‌کنند (Tabil, 1996).

جدول ۲- میانگین هندسی ذرات و انحراف معیار در حالات مختلف

Table 2- Geometric mean particle diameter and standard deviation at various types

سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	محتوای رطوبتی Moisture content (w.b %)	میانگین هندسی اندازه Geometric mean particle diameter (mm)	انحراف معیار Standard deviation (mm)
150	35	1.06	0.16
150	40	1.08	0.22
150	45	1.16	0.21
200	35	1.05	0.12
200	40	1.05	0.23
200	45	1.02	0.24
250	35	1.26	0.23
250	40	1.31	0.22
250	45	1.38	0.21

نتایج تجزیه واریانس سطوح مختلف محتوای رطوبتی و سرعت دورانی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳، اثر عوامل محتوای رطوبتی و سرعت دورانی در سطح آماری ۱٪ و اثر متقابل آن‌ها در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار شده است.

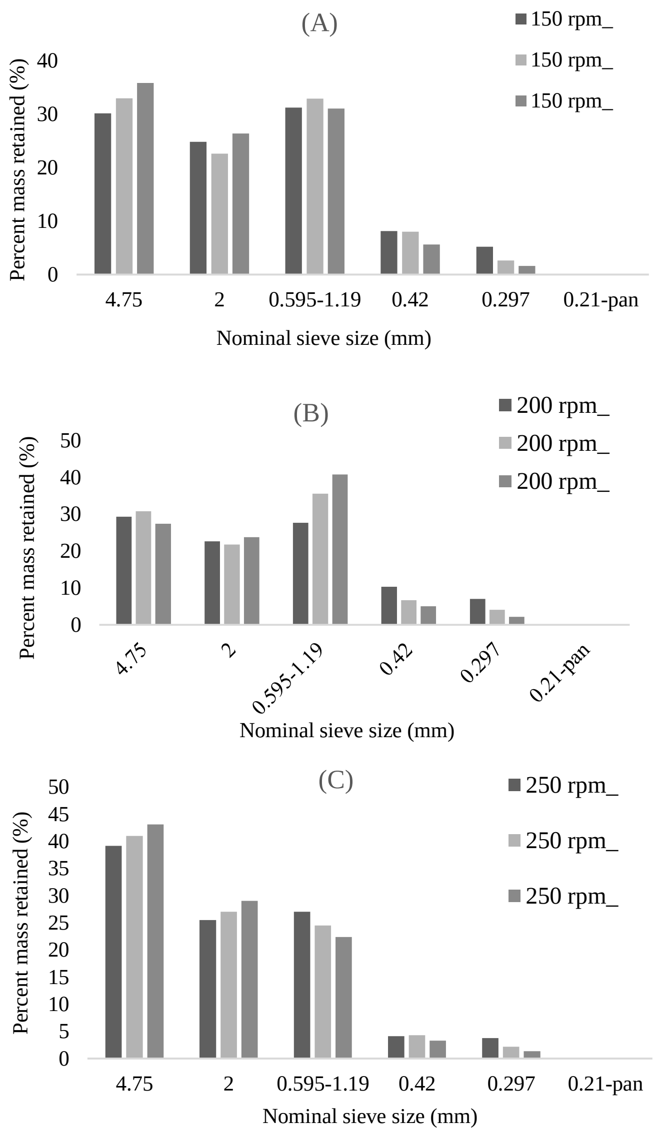
جدول ۳- تجزیه واریانس میانگین هندسی اندازه ذرات

Table 3- Analysis of variance of geometric mean particle diameter

منابع تغییر **Source of variation**	درجه آزادی **df**	مجموع مربعات **Sum of square**	**F**
سرعت دورانی Rotational of speed	2	0.353	690.827**
محتوای رطوبتی Moisture of content	2	0.038	74.089**
سرعت دورانی× محتوای رطوبتی Moisture of content× Rotational of speed	4	0.004	3.499*
خطا Error	18	0.005	

** و * به‌ترتیب معنی‌داری احتمال در سطح ۱٪ و ۵٪

** and * show significant difference at 1% and 5% level of probability, respectively.



شکل ۷- توزیع اندازه ذرات و درصد باقی‌مانده بر روی الک‌ها: الف- سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه، ب- سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه، ج- سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه

Fig.7. Distribution of particle size and percent mass retained on sieve: A) Rotational speed 150 rpm, B) Rotational speed 200 rpm, C) Rotational speed 250 rpm

توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات کود گاوی مرطوب آسیاب شده در سه سطح رطوبتی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد (برپایه تر)، و سه سرعت دورانی ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ دور بر دقیقه در قسمت‌های مختلف شکل ۷ نشان داده شده است. ذرات آسیاب شده با محتوای رطوبتی ۳۵ و ۴۰ درصد (بر مبنای تر) نسبت به ذرات آسیاب شده با محتوای رطوبتی ۴۵ درصد دارای توزیع اندازه ذرات گسترده‌تری بودند.

از آزمون شاپیرو – ویلک[1] برای تعیین نرمال بودن توزیع اندازه ذرات در حالات مختلف استفاده شد (جدول ۴). W مقدار آماری آزمون و P مقدار احتمال است که برای قبول یا رد فرضیه نرمال بودن توزیع استفاده می‌شود. در این آزمون اگر مقدار P > ۰/۰۵ باشد توزیع نرمال خواهد بود. در تمام حالت‌های مختلف خرد کردن مواد با سه سطح محتوای رطوبتی و سه سطح سرعت دورانی کوبنده، توزیع‌های به‌دست آمده از خرد کردن ذرات نرمال بودند. در جدول ۴ مقدار چولگی و کشیدگی توزیع کود گاوی آسیاب شده آورده شده است. اگر توزیع اندازه ذرات چوله به راست باشد مقدار چولگی بزرگ‌تر از صفر و اگر چوله به چپ باشد مقدار کوچک‌تر از صفر خواهد بود. اگر توزیع اندازه ذرات کاملاً نرمال باشد مقدار چولگی برابر با صفر خواهد بود. همچنین اگر مقدار کشیدگی توزیع بیشتر از توزیع نرمال باشد کشیدگی مقداری مثبت و در حالت کشیدگی کمتر، مقداری منفی خواهد داشت. توزیع اندازه ذرات وسیع‌تر برای فشرده‌سازی مواد (بریکت و پلت‌سازی) مناسب‌تر گزارش شده است (Adapa *et al.*, 2011; Mani *et al.*, 2004). بنابراین کود گاوی خرد شده جهت فشرده‌سازی و تولید پلت با کیفیت باید دارای توزیع نرمال (آزمون شاپیرو – ویلک: P > ۰/۰۵)، چولگی نزدیک به صفر و کشیدگی کمتر از توزیع کاملاً نرمال (کشیدگی کوچک‌تر از صفر) داشته باشند. بر پایه این تئوری می‌توان بهترین حالت را برای آسیاب کود گاوی مرطوب انتخاب کرد (جدول ۴).

جدول ٤– محاسبه توزیع ذرات در حالات مختلف خرد کردن کود گاوی مرطوب در سه سطح رطوبتی و سه سطح سرعت دورانی کوبنده

Table 4- Calculation of particle size distribution of cattle manure grinds obtained from size reduction machine using three different rotational speed and three different moisture content (w.b%)

محتوی رطوبتی (٪) Moisture content (w.b %)	سرعت دورانی Rotational speed (rpm)	آزمون شاپیرو – ویلکز Shapiroe Wilk Test[a]	چولگی Skewness[b]	کشیدگی Kurtosis[c]	توزیع Observation
35	150	W= 0.835 ; P= 0.151	-0.478	-2.99	P >0.05
35	200	W=0.874 ; P= 0.283	-0.425	-2.75	P >0.05
35	250	W= 0.877 ; P= 0.297	-0.056	-2.15	P >0.05
40	150	W= 0.87; P= 0.267	-0.333	-2.64	P >0.05
40	200	W= 0.903 ; P= 0.426	-0.127	-2.68	P >0.05
40	250	W= 0.911 ; P= 0.474	0.076	-1.77	P >0.05
45	150	W = 0.87; P= 0.265	-0.439	-2.82	P >0.05
45	200	W= 0.925 ; P= 0.564	0.095	-1.72	P >0.05
45	250	W= 0.924 ; P= 0.559	0.196	-1.68	P >0.05

a: Shapiroe Wilk Test: Data is normally distributed if P > 0.05;Wis statistical value of the test; P is the probability value used to accept or reject the hypothesis of whether the data is normally distributed or not.

b: Skewness: Skewness to the left (negative value); Skewness to the right (positive value).

c: Kurtosis: Peak is lower than expected for the normal (negative value); peak is higher than expected for the normal distribution (positive value).

براساس فرضیه گفته شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت برای کود گاوی مرطوب در رطوبت ۳۵ درصد بهترین توزیع جهت فشرده‌سازی در حالت آسیاب با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵ چولگی= ۰/۰۵۶- و کشیدگی= ۲/۱۵-) به‌دست آمد. برای رطوبت ۴۰ درصد بهترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۷۶ و کشیدگی=۱/۷۷-) به‌دست آمد. همچنین برای رطوبت ۴۵ درصد بهترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه (P > ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۹۵ و کشیدگی=۱/۷۲-) به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب ساخته شد. عمده نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به‌صورت زیر است.

۱- در مقایسه استفاده از دستگاه خردکن کود گاوی مرطوب در خط تولید پلت کود گاوی با آنچه در روش مرسوم آن (استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن و آسیاب چکشی) به‌کار گرفته می‌شود، میزان انرژی مصرفی ویژه جهت خرد کردن کاو گاوی تا ۹۲٪ کاهش یافت.

۲- کمترین میانگین هندسی اندازه ذرات مربوط به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و محتوای رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۱/۰۲ و بیشترین آن در سرعت دورانی۲۵۰ دور بر دقیقه و

1- Shapiro- wilk test

محتوی رطوبتی ۴۵ درصد (بر مبنای تر) برابر با ۱/۳۸ میلی‌متر اتفاق افتاد.

۳- توزیع اندازه ذرات در کل آزمایش‌ها به‌صورت نرمال و برای کود گاوی مرطوب در محتوای رطوبت ۳۵ درصد گسترده‌ترین توزیع در سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه (P < ۰/۰۵ چولگی= ۰/۰۵۶- و کشیدگی= ۲/۱۵-)، محتوای رطوبتی ۴۰ درصد گسترده‌ترین توزیع در سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه (P < ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۷۶ و کشیدگی=۱/۷۷-) و در محتوای رطوبتی ۴۵ درصد گسترده‌ترین توزیع در حالت آسیاب با سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه (P < ۰/۰۵، چولگی=۰/۰۹۵ و کشیدگی=۱/۷۲-) به‌دست آمد.

References

1. Adapa, P., L. Tabil and G. Schoenau. 2011. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. Biomass and Bioenergy 35: 549-561.
2. Afzalinia, S., and M. Roberge. 2007. Physical and mechanical properties of selected forage materials. Canadian Biosystems Engineering 49: 2.
3. ASAE S319.3. 2000. Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. ASAE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org
4. ASAE S358.3. 2012. Moisture measurement forages. ASAE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org.
5. Cadoche, L., and G. D. López. 1989. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. Biological Wastes 30: 153-157.
6. Drzymała, Z. 1993. Industrial briquetting: Fundamentals and methods. Elsevier Science Ltd.
7. Hideno, A., H. Inoue, K. Tsukahara, S. Fujimoto, T. Minowa, S. Inoue, T. Endo, and S. Sawayama. 2009. Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw. Bioresource Technology 100: 2706-2711.
8. Klenin, N. I., I. F. Popov, and V. A. Sakun. 1985. Agricultural machines : theory of operation, computation of controlling parameters, and the conditions of operation. Amerind Publishing Company. New Delhi.
9. Kobayashi, N., P. Guilin, J. Kobayashi, S. Hatano, Y. Itaya, and S. Mori. 2008. A new pulverized biomass utilization technology. Powder Technology 180: 272-283.
10. Kratky, L., and T. Jirout. 2011. Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. Chemical Engineering & Technology 34: 391-399.
11. Kratky, L., and T. Jirout. 2014. Energy-Efficient Size Reduction Technology for Wet Fibrous Biomass Treatment in Industrial Biofuel Technologies. Chemical Engineering & Technology 37: 1713-1720.
12. Kratky, L., and T. Jirout. 2015. Mechanical disintegration of wheat straw by roller plate grind system with sharp edged segments. Acta Polytechnica 55: 113-122.
13. Lopo, P. 2002. The right grinding solution for you: roll, horizontal or vertical. Feed Management 53: 23-26.
14. Mandels, M., L. Hontz and J. Nystrom. 1974. Enzymatic hydrolysis of waste cellulose. Biotechnology and Bioengineering 16: 1471-1493.
15. Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansanj. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy 27: 339-352.
16. Nayyeri, M. A., M. H. Kianmehr, and A. Arab Hsseini. 2008. Construction and Evaluation of a Prototype Moist Dairy Cattle Manure Dryer. MSc Thesis, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
17. Ortega-Rivas, E., P. Juliano, and H. Yan. 2006. Food powders: physical properties, processing, and functionality. Springer Science & Business Media.
18. Padilla-Rivera, A., J. Barrette, P. Blanchet, and E. Thiffault. 2017. Environmental Performance of Eastern Canadian Wood Pellets as Measured Through Life Cycle Assessment. Forests 8: 352.
19. Payne, J. D. 1978. Improving quality of pellet feeds. Milling Feed and Fertiliser 161: 34
20. Reddy, M. C. 2014. Physical and frictional properties of donkey manure at various depths in compost pit. Journal of Academia and Industrial Research 2: 503-506.
21. Rezaeifar, J., M. H. Kianmehr, S. R. Hassan-Beygi, and B. Azadegan. 2008. Physical properties of pletted cattle manure. Journal of Agriculture 10: 53-68.
22. Rezvani, Z., Gh. Chegini, A. Arabhosseini, M. H. Kianmehr, and M. R. Asadi. 2013. Determining the specific energy consumption for grinding Rice straw with a hammer mill. Journal of Automotive and Applied Mechanics 1: 4-9.
23. Safari, M., and R. Abdi. 2015. Comparison of biogas production from rapeseed and wheat residues in compound with cattle manure. Journal of Agricultural Machinery 6: 476-487.
24. Schell, D. J., and C. Harwood. 1994. Milling of lignocellulosic biomass. Applied Biochemistry and biotechnology 45: 159-168.

25. Soleymani, J., M. H. Kianmehr, S. R. Hassan-Beygi, and S. M. Shariatmadari. 2018. Design, fabrication and evaluation of a wet cattle manure size reduction machine. Msc Thesis, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi).
26. Suna. 2012. Renewable Energy and Energy Efficiency Organization. Available at: :http://www.suna.org.ir/suana_content/media/image/2012/10/1734_org.pdf. Accessed 2012/10/17. (In Farsi)
27. Tabil, L. 1996. Pelleting and binding characteristics of alfalfa. Unpublished Ph. D. thesis, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, Saskatoon, SK Canada: University of Saskatchewan.
28. Taherzadeh, M. J., and K. Karimi. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International Journal of Molecular Sciences 9: 1621-1651.
29. Zanker, A. 1980. Mining engineering, How to Size smooth Roll Crushers. Available at: https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/How-to-Size-Smooth-Roll-Crushers.pdf. Accessed 2017/5/17.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 115-128

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۲۸-۱۱۵

Design, Fabrication and Evaluation of a Wet Cattle Manure Size Reduction Machine

J. Soleimani[1], M. H. Kianmehr[2*], S. R. Hassan-Beygi[3], S. M. Shariatmadari[4], K. Rezapoor[5]

Received: 31-07-2018
Accepted: 30-12-2018

Introduction

The annually production of cattle manure is estimated around six million tons in Iran. Manure transportation with high moisture and low density recognized as crucial issue. The densification of dry or wet manure is the profound method for decreasing the manure volume which reduces the cost of handling and storage. Besides, the particle size is one of the important factors in the pellet production. Ball mills, vibratory mills, hammer mills, knife mills, two roll mills, colloid mills, attrition mills, or extruders can be used for size reduction of biomass. Specific energy consumption for size reduction of biomass highly depends on moisture content, bulk and particle densities, feed rate of the material, particle size distribution (initial/final particle size) and machine variables. The present study is conducted for wet cattle manure size reduction machine. Furthermore, the relationship between moisture content (35, 40 and 45 %w.b) and drum of special size reduction machine in rotational speed (150, 200 and 250 rpm) considering geometric mean diameter of particle and size distribution of wet cattle manure were investigated. A factorial experiment under randomized complete design method was employed with three replications.

Materials and Methods

The main parts of machine include drum, concave, spring and adjusting screw. The main function of this thresher machine is to combine crushing and cutting in order to conduct the size reduction methods, i.e., to apply compressive and shear forces to the cattle manure particles. The drum is also equipped with several rows of sharp-edged milling segments. The spring constants were determined by evaluating the slope of the force vs. deflection curves. The rotational speed of drum was changed in the range of 100-700 rpm during these experiments. In the test of the machine physical properties of grinds such as geometric mean diameter of grind particles and particle size distribution were determined. One kg of cattle manure was grinded in each test and the particle size distribution of grinded cattle manure was determined according to ASAE standard S319.3. The moisture content of cattle manure was obtained according to ASAE standard S358.3.

Results and Discussion

The initial and final particle size of the materials are 20 millimeters and less than 5 millimeters, respectively and the angle of nip is 30 degrees (according to the installation space limitations), the diameter of the drum is 310 millimeters. The spring constant was equal to 24.371 N / mm and on the basis of the experiments a drum speed in the range of 150–250 rpm is considered to be optimal settings for the milling for cattle manure disintegration. The results of Table 4 show that for wet cattle manure with 35% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = -0.056; Kurtosis = -2.15), 40% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = 0.076; Kurtosis = -1.77), 45% (w.b) moisture content at 200 rpm rotational speed of drum ($P > 0.05$; Skewness = 0.095; Kurtosis = -1.72), in grinds that would potentially produce better compacts. The geometric mean particle size and standard deviation for each test are shown in Table 2. According to Table (2), the lowest geometric mean of particle size is related to rotational speed of 200 rpm and a moisture content of 45% (w.b), and the highest at rotational speed of 250 rpm and a moisture content of 45% (w.b) can be observed.

Conclusions

1- The use of cattle manure of thresher machine reduces the specific energy consumption of cattle manure by 92% compared to the conventional method (using drying and hammer mill) in the pellet production.

1- Researcher of Research and Innovation Center of ETKA Organization, Tehran, Iran, Master of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
2- Professor of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
3- Professor of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
4- Lecturer of Agrotechnology, University of Tehran, College of Abouraihan, Tehran, Iran
5- Production Assistant of Mazareh Novin Iraniain Holding co
(*- Corresponding Author Email: kianmehr@ut.ac.ir)

2- The lowest geometric mean diameter of wet cattle manure was 1.02 millimeter for drum rotational speed of 200 rpm at 45% (w.b) moisture content and the highest was 1.38 at rotational speed of 250 rpm and a moisture content of 45% (w.b%).
3- The best particle size distribution was observed for milling of wet cattle manure with 35% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = -0.056; Kurtosis = -2.15), 40% (w.b) moisture content at 250 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = 0.076; Kurtosis = -1.77), 45% (w.b) moisture content at 200 rpm rotational speed of drum (P> 0.05; Skewness = 0.095; Kurtosis = -1.72)

Keywords: Geometric particle diameter, Particle size distribution, Wet cattle manure, Wet cattle manure size reduction machine